УДК 622.245.54

ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕЗАНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫМ СПОСОБОМ ПЕРЕМЕЩАЮЩЕЙСЯ ЭЛЕКТРОДНОЙ СИСТЕМОЙ

В.Ф. Важов, М.Ю. Журков, В.М. Муратов*

Томский политехнический университет
E-mail: zhurkov@hvd.tpu.ru
*ГНУ "НИИ высоких напряжений" при ТПУ

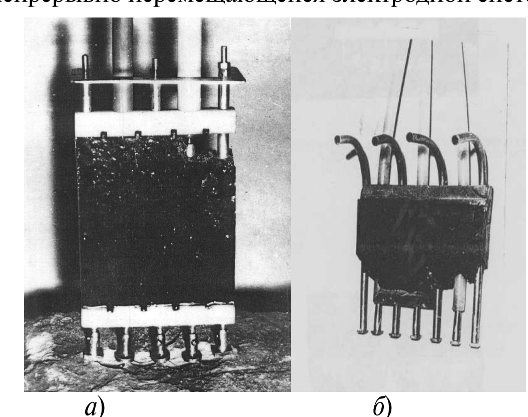
Рассматривается электроразрядный способ резания горных пород перемещающейся электродной системой. Получены зависимости ширины щели разреза как от энергии в разряде, так и от скорости перемещения электродной системы. Показана возможность снижения энергии, запасаемой накопителем энергии в 10...16 раз. Проведено сравнение полученных результатов с литературными данными.

В настоящее время существует множество различных способов резания материалов. Среди них механические, термические, гидродинамические, химические и др. В НИИ высоких напряжений при ТПУ и на кафедре ТЭВН ТПУ разрабатывается принципиально новый способ резания – электроразрядный. Электроразрядный способ резания диэлектрических и полупроводящих материалов основан на внедрении канала пробоя в твердое тело при расположении электродов на одной его поверхности в среде диэлектрической жидкости и даже воды. Длительность воздействия импульса напряжения до пробоя – не более ед. мкс. При пробое происходит микроэлектровзрыв в твердом теле с образованием откольной воронки. Разрушение твердого тела осуществляется за счет суммарного действия напряжений, создаваемых вокруг канала электрического пробоя вследствие высокого давления, развиваемого в нем, и напряжений, возникающих в среде при распространении ударных и акустических волн. Инструментом, разрушающим твердое тело, является расширяющаяся плазма канала пробоя. Поэтому износ электродов, изготовленных из обычных сталей, чрезвычайно мал и составляет $15{,}3 \cdot 10^{-6}$ г/имп.

Различными авторами [1, 2] были проведены исследования, показавшие принципиальную возможность электроразрядного резания горных пород и диэлектрических материалов. Эти исследования выявивили ряд недостатков: а) необходимы большие энергии для проведения единичного акта разрушения, и, как следствие, мощные крупногабаритные генераторы импульсных напряжений (ГИН); б) изоляция электроимпульсных режущих устройств малонадежна; в) имеет место значительное снижение амплитуды напряжения при резании в воде из-за несовершенств предлагаемых многоэ-

лектродных систем. Из рис. 1, *а, б* видно, что толщина изоляции между разнополярными электродами определяется межэлектродным расстоянием. При напряжении, равном пробивному напряжению горной породы изоляция быстро выходит из строя за счет интенсивного старения и кумулятивного эффекта. Кроме этого, гидроудары и абразивное воздействие шлама механически разрушают изоляцию. Для уменьшения влияния этих явлений была предложена идея двухстержневого электродного рабочего инструмента (резака) с непрерывным его перемещением вдоль траектории реза. Фотография электродной системы, используемой нами, показана на рис. 2. Как видно из рис. 2, у предлагаемой электродной системы отсутствуют недостатки, характерные для многоэлектродных систем (рис. 1).

Использование идеи непрерывно перемещающейся электродной системы для прорезания длинных щелей привело к необходимости проведения целого комплекса исследований ввиду отсутствия подобных результатов в литературе. Априори анализ процесса резания при непрерывно перемещающейся по траектории реза электродной системе показал, что существует возможность значительного снижения энергии, запасаемой ГИН, и, как следствие, соответственного уменьшения его массогабаритных характеристик. В связи с высказанными предположениями были проведены исследования процесса электроразрядного разрушения горных пород под слоем воды при значительном снижении энергии в разряде и непрерывно перемещающейся электродной системе.



а) *б*)

Рис. 1. *Фотографии многоэлектродных стержневых резаков: а) исходный, б) подобный, с разрушенной изоляцией*



Рис. 2. *Фотография двухстержневого резака и разрезанного им образца песчаника*

Процесс резания характеризуется такими параметрами, как производительность, энергозатраты, шероховатость и ширина получаемой щели, количество отходов при резании. Ранее нами было показано, что производительность и энергозатраты при электроразрядном способе резания зависят от энергии генератора в разряде, от количества импульсов на единицу вновь образуемой поверхности, от величины межэлектродного промежутка, от крепости обрабатываемого материала [2, 3]. От этих же параметров зависит и ширина прорезаемой щели. Ширина щели определяет расход энергии на ее образование, потери обрабатываемого материала, скорость резания и др.

Ширина щели в первую очередь определяется глубиной внедряющегося канала разряда. Максимальная глубина внедрения канала разряда в дно и стенки щели h зависит от межэлектродного расстояния и для рассматриваемых нами расстояний $S = 20...28$ мм может быть аппроксимирована выражением

$$h \leq (0{,}25...0{,}3)S, \text{ мм}.$$

Тогда ширина щели b для неподвижных электродов должна быть

$$b \geq 2h + d = (0{,}5...0{,}6)S + d, \text{ мм}$$

где d – толщина (диаметр) электродов.

Ширина щели зависит также от энергии, запасаемой высоковольтным генератором (ГИН) $W_{ГИН}$, и количества импульсов. В проведенных нами экспериментах по резанию гранита и песчаника в воде энергия, запасенная ГИН, изменялась от 28 до 125 Дж, что в 10...16 раз меньше, чем рекомендуется в [1]. На рис. 3 приведена осциллограмма импульса напряжения, где длительность фронта импульса $\tau_ф \approx 0{,}15$ мкс, длительность импульса $\tau_и \approx 14$ мкс. Пробой осуществлялся на фронте импульса (песчаник) или его амплитуде (гранит).

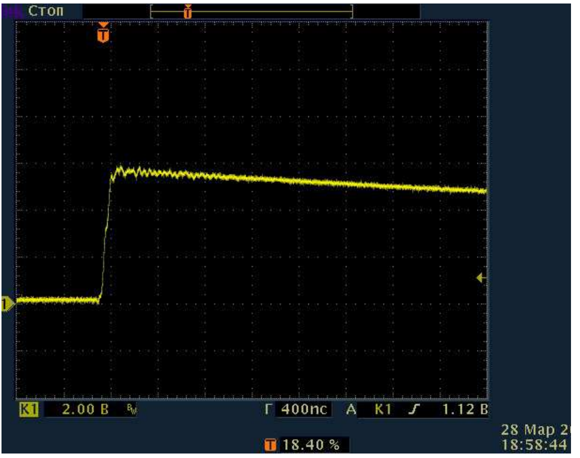


Рис. 3. *Осциллограмма импульса напряжения ГИН на холостом ходу, амплитуда импульса 240 кВ*

Геометрические размеры образцов (гранит, песчаник ...) в среднем составляли 400×300×200 мм. Нами получены зависимости изменения ширины щели от энергии, запасаемой ГИН, при одном и том же шаге перемещения и от шага перемещения электродной системы при одной и той же энергии, запа-

саемой ГИН (рис. 4). Расстояние между электродами резака для песчаника составляло S = 28 мм и 23 мм для гранита. Как видно из графиков, ширина щели с увеличением шага перемещения электродной системы уменьшается (кривая 2). Это очевидно, т.к. при этом уменьшается число импульсов, которые воздействуют на горную породу на длине межэлектродного промежутка, и, следовательно, объем горной породы, откалываемый от стенок щели, уменьшается. При увеличении энергии генератора ширина щели увеличивается (кривая 1), т.к. увеличивается производительность единичного импульса вследствие увеличения длины образующихся трещин и зоны разрушения вокруг канала разряда [1], т.е. ширина щели определяется не только глубиной внедрения канала разряда, но и пластичностью разрушаемого материала, и при одинаковых S ширина щели для гранита будет больше, чем для песчаника вследствие большей хрупкости гранита.

При выборе оптимального режима резания с точки зрения эффективности можно исходить из различных критериев – производительность, энергозатраты, геометрические параметры получаемой щели, первичные капиталовложения и др.

Увеличение энергии в разряде вызывает повышение производительности разрушения единичного импульса, и, как следствие, ширины щели, а также значительное возрастание массогабаритных параметров всего высоковольтного оборудования и, в первую очередь, генератора импульсов. Переход на режим резания с повышенной частотой срабатывания для подобных ГИН приводит к ряду негативных последствий (срок службы уменьшается, затруднительно создание длительно работающих разрядников на большие токи, высокие энергозатраты, экологические проблемы и ряд других). Поэтому необходимо стараться минимизировать энергию генератора в разряде.

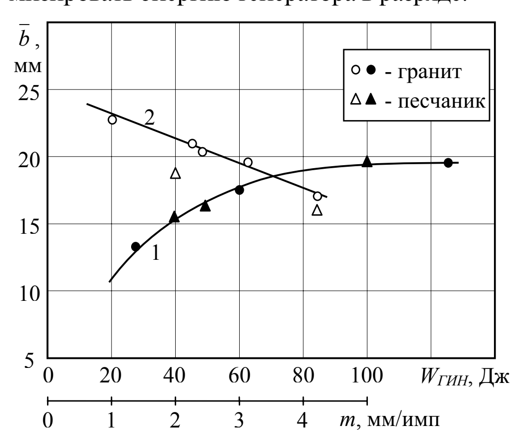


Рис. 4. *Зависимость ширины щели от энергии, запасаемой ГИН, и шага перемещения для гранита и песчаника: 1)* $\bar{b} = f(W_{ГИН})$; *2)* $\bar{b} = f(m)$

Наши исследования показали, что при оптимизации процесса резания по минимуму энергозатрат для всех исследуемых материалов наблюдается оптимум энергии, затраченной на длине межэлектродного промежутка (МЭП) $W_{МЭП}^{опт}$, при котором удельные энергозатраты минимальны $W_{уд}^{мин}$. Так, для перемещающихся электродов при S = 20 мм оптимальное значение энергии, затраченной на длине межэлектродного промежутка для песчаника $W_{МЭП}^{опт}$ ~ 190 Дж; для гранита – $W_{МЭП}^{опт}$ ~ 900 Дж [4]. При этом значения $W_{уд}^{мин}$ при перемещении электродов в 1,4 раза больше, чем при неподвижных электродах. Увеличение удельных энергозатрат при перемещении электродов, главным образом, связано с уменьшением глубины разрушения прорезаемой щели при равном числе импульсов. Шаг перемещения электродной системы определяется из выражения

$$m = S/(W_{МЭП}/W_{ГИН}).$$

Для достижения минимума ширины щели необходимо максимально снизить энергию ГИН в разряде. Пусть $W_{ГИН}$ = 30 Дж, тогда шаг перемещения электродов должен быть 3,16 мм/имп. – для песчаника, а для гранита – 0,67 мм/имп.

При таком шаге перемещения m ширина щели b оказывается больше минимально возможной (рис. 4).

Для достижения минимума ширины получаемой щели шаг перемещения электродной системы за один импульс необходимо увеличивать. Так, исходя из рис. 4, максимальный шаг перемещения составляет 4,2 мм/имп. для песчаника и гранита. Дальнейшее увеличение шага приводит к большой шероховатости стенок щели и затруднениям при перемещении электродной системы.

При заданном шаге m = 4,2 мм/имп. число импульсов на промежуток S составит

$$n = S/m = 20/4{,}2 \approx 5 \text{ имп.},$$

а энергия на межэлектродный промежуток при запасаемой генератором энергии $W_{ГИН}$ = 30 Дж составит

$$W_{МЭП} = n \cdot W_{ГИН} = 5 \cdot 30 = 150 \text{ Дж}.$$

С точки зрения минимума энергозатрат при выбранном шаге перемещения электродной системы энергозатраты будут больше оптимальных, но при этом получаются минимальные ширина щели и расход обрабатываемого материала.

Сравнение результатов, полученных нами, с уже известными результатами по резанию горных пород многоэлектродными резаками показало, что удельные энергозатраты при одинаковой длине разрядных промежутков для двухстержневой электродной системы значительно (в 4,7...5,7 раза) меньше. При этом снижение энергии в разряде составило 10...16 раз. Лучшие показатели резания двухэлектродной системой резания обусловлены уменьшением ширины щели в 2,5...2,7 раза, отсутствием "зависаний" электродной системы на стенках щелей, увеличением вероятности внедрения канала разряда в горную породу, а также значительным уменьшением потерь энергии в предпробивной стадии, особенно в воде, что определяется конструктивными особенностями двух- и многоэлектродных систем.

Из рассмотренного выше следует, что оптимизация процесса резания – это задача, которая зависит от множества различных факторов. Необходимо рассчитывать различные режимы резания и из сравнительного анализа выбирать наиболее подходящий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семкин Б.В., Усов А.Ф., Курец В.И. Основы электроимпульсного разрушения материалов. – СПб.: Наука, 1993. – 276 с.
2. Важов В.Ф., Журков М.Ю. Оптимизация энергии в разряде при резании горных пород электроимпульсным способом // Современные техника и технологии: Труды XI Междунар. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск, 2003. – С. 92–93.
3. Jgun D., Jurkov M., Lopatin V., Muratov V., Vajov V., Gubsch I., Kunze G., Neubert M.. Application of pulsed discharges for materials cutting // Digest of Paper of 1st European Pulsed Power Symposium. 22–24 October, 2002. – French-German Research Institute of Saint-Louis (ISL), France. – P. 22/1–22/4.
4. Важов В.Ф., Журков М.Ю., Муратов В.М. Резание горных пород электрическими импульсными разрядами подвижной электродной системой в воде // Электромеханика, электротехнологии и электроматериаловедение: Труды V Междунар. конф., МКЭЭЭ-2003 (ICEEE-2003). – М.: ИЭ МЭИ, 2003. – Ч. II. – С. 122–125.

УДК 621.785:669.14.08.29